



Tokyo Tech

Press Release

2023年5月19日

東京工業大学

超高速量子経路干渉法による GaAs 半導体中の電子デコヒーレンス時間測定

【要点】

- 電子とフォノンが結合した量子系を光パルスで制御し、電子状態の干渉形状の変化をフェムト秒の時間精度で計測。
- GaAs 単結晶中の光励起電子のデコヒーレンス時間を定量的に決定。
- 光励起電子のデコヒーレンス過程が周りの電子との衝突によることを解明。

【概要】

東京工業大学 物質理工学院 材料系の高木一旗大学院生（博士後期課程2年）、科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所の萱沼洋輔特任教授（研究当時。現 大阪公立大学 客員教授）と中村一隆准教授らの研究グループは、**フェムト秒**（用語1）**光パルス**（用語2）を利用した超高速量子経路干渉法を用いて、半導体単結晶における電子デコヒーレンス時間の計測に成功した。さらに光誘起電子のデコヒーレンス過程は周りの電子との衝突によることを明らかにした。

量子力学特有の重ね合わせ状態が持つ特質である量子コヒーレンスが、環境との相互作用によって失われるデコヒーレンス現象は、固体中では非常に急速に起こるため、これまで定量的な評価が極めて難しかった。本研究では、電子状態の**干渉**（用語3）による強度のパルス時間遅延依存性から、電子のデコヒーレンス時間を求めた。具体的には、ガリウム(Ga)とヒ素(As)からなる半導体単結晶に2つの光パルスを照射することで、半導体中の電子状態と**フォノン**（用語4）状態が持つ波の性質である重ね合わせ状態を測定する、時間領域の干渉実験を行った。この実験では、2つの光パルスの**偏光**（用語5）角度を45度に設定することで、特異な干渉形状を観測できた。また量子理論モデル計算と合わせた解析を行うことで、電子デコヒーレンス時間を定量的に決定できた。この電子デコヒーレンス時間の温度依存性の解析から、電子デコヒーレンス過程が光励起電子と周りの電子との衝突で起こっていることを明らかにした。

本研究成果は5月11日付（現地時間）に米国物理学会誌「*Physical Review B*」のオンライン版に掲載された。

●背景

量子コヒーレンスは、量子力学特有の重ね合わせ状態を持つ特質であり、量子コンピュータや量子情報通信などの新しい量子技術に利用されている。量子コヒーレンスが環境との相互作用によって失われることは、デコヒーレンスと呼ばれている。固体中においては、デコヒーレンスは非常に急速に起こるため、その定量的な評価（特に電子デコヒーレンスについて）は極めて難しかった。

本研究グループはこれまでの研究で、超高速量子経路干渉法（光振動周期の相対位相（用語6）を制御したフェムト秒光パルスペアを用いた過渡反射率計測法）を開発し、量子コヒーレンス計測の研究を行ってきた。平行偏光条件において、GaAs単結晶の超高速量子経路干渉計測を行い、90 Kの温度で電子デコヒーレンスによる干渉が光パルス幅よりも長く続くことを観測しているが、複雑な干渉形状のため、電子デコヒーレンス時間を定量的に評価することはできなかった（参考文献1）。一方で、電子フォノン結合系の光励起に関して、光偏光方向を考慮した量子モデルを構築して計算を行うことで、45度相対偏光パルスペア励起の場合の干渉形状が電子デコヒーレンス時間に顕著に依存し、その形状変化が非常に可視化しやすいことを見出した（参考文献2）。本研究では、この理論予測に基づいて実験を行い、その結果と理論モデルを合わせることで、電子デコヒーレンス時間の計測を目指した。

●研究の手法と成果

本研究グループは、ガリウム（Ga）とヒ素（As）からなる半導体単結晶を対象とし、超高速量子経路干渉法を用いて電子状態の干渉の計測を行った。この計測法では、2つのフェムト秒光パルスをタイミングをずらして試料に照射する。1番目の光パルス（励起光）で作った量子状態（電子状態とフォノン状態）と時間が遅れて照射される2番目の光パルス（制御光）で作った量子状態が干渉する。干渉の影響を受けたフォノン振動は、さらに別の光パルス（観測光）の反射率変化として計測できる。この実験の特徴は、励起光と制御光の時間遅延を300アト秒（用語1）間隔で制御していることと、相対偏光角度を45度に行っていることである。

この実験では、フォノン強度に時間遅延の関数として干渉縞が観測された（図1左）。この干渉縞は、約2.7 fs周期の電子干渉縞と約116 fs周期のフォノン干渉縞で構成されている。このうち電子干渉縞には、遅延時間55 fs付近に三角形の持ち上がりが見られた。温度が下がるに従って、この三角形の底辺と高さは大きくなる。この温度による干渉形状の変化は、電子デコヒーレンス時間の変化によるものであり、簡単な量子モデル計算と合わせることで再現できた（図1右）。

この実験で得られた三角形の持ち上がりの高さから、試料温度10 K、90 K、290 Kにおける、電子デコヒーレンス時間を定量的に求めることに成功した（図2b）。この電子デコヒーレンス時間の温度依存性は、光励起電子が自由電子近似での運動量を持って、周りの熱的電子と衝突するとしたモデル（図2a）で理論計算すると、よく再現された（図2b）。このことから、光誘起電子のデコヒーレンス過程は周りの電子との衝突によることが確かめられた。

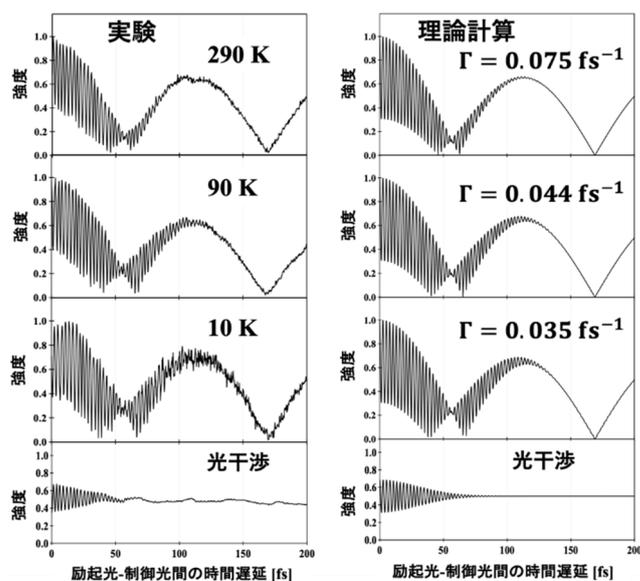


図1 フォノン強度の励起光と制御光と時間遅延依存性。左は実験結果、右は理論計算結果。
 Γ は電子デコヒーレンス時間の逆数に対応するパラメーターである。

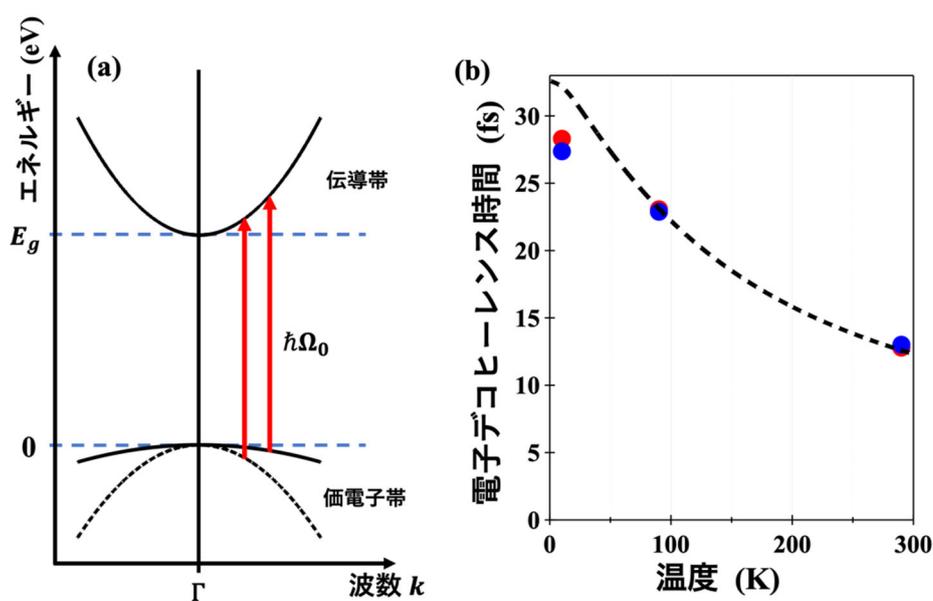


図2 電子デコヒーレンス時間の温度依存性。左はイメージ図、右は温度依存性結果。
 青丸と赤丸は三角形の持ち上がりの高さから求めた電子デコヒーレンス時間、
 点線は電子衝突から見積もった理論値である。

●社会的インパクト

量子コヒーレンスは、量子力学特有の重ね合わせ状態を持つ特質であり、量子コンピュータや量子情報通信などの新しい量子技術の鍵となる性質である。フェムト秒時間スケールである電子デコヒーレンス時間の定量的な評価に成功した今回の成果は、これまで不明だった固体中の量子デコヒーレンス過程の解明につながるものであり、今後の量子情報技術発展の基礎を固めるものと期待される。

●今後の展開

今回の研究では、45 度偏光パルスを用いた量子経路干渉法と理論モデル計算により、GaAs 単結晶における電子デコヒーレンス時間の定量評価に成功した。今後は、この研究手法を結晶構造やバンドギャップの異なる物質系へ応用し、多くの固体物質中で電子デコヒーレンス時間を計測することで、量子デコヒーレンス過程のさらに詳しい理解につながると期待される。

●付記

本成果は JSPS 科学研究費助成事業 19K03696、19K22141、21K18904、21H04669、22H01984、22J23231、22KJ1342、文部科学省 6 大学インヴァースイノベーション研究、および東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所共同利用研究の支援を受けて行われた。

【参考文献】

- (1) K. G. Nakamura, K. Yokota, Y. Okuda, R. Kase, T. Kitashima, Y. Mishima, Y. Shikano, and Y. Kayanuma: Ultrafast quantum-path interferometry revealing the generation process of co-herent phonons, Phys. Rev. B 99, 180301(R) (2019).
(東工大ニュース：2019 年 5 月 23 日付「超単パルス光を用いて固体中の量子経路干渉を観測」 <https://www.titech.ac.jp/news/2019/044341>)
- (2) I. Takagi, Y. Kayanuma, and K. G. Nakamura: Theory for coherent control of longitudinal optical phonons in GaAs using polarized optical pulses with relative phase locking, Phys. Rev. B 104, 134201 (2021).
(東工大ニュース：2021 年 10 月 14 日「フェムト秒の光パルス照射で縦波光学フォノンをコヒーレント制御する、量子力学に基づく理論を構築」
<https://www.titech.ac.jp/news/2021/062118>)

【用語説明】

- (1) **フェムト秒・アト秒**：フェムト秒 (fs) は 1,000 兆分の 1 秒。アト秒 (as) はフェムト秒の 1,000 分の 1。
- (2) **パルス**：ごく短時間の間に生じる振動現象で、電流や電波などがある。
- (3) **干渉**：物理学においては、同じ種類の 2 つ以上の波動が出合ったとき、それらが重なって互いに強め合ったり弱め合ったりして新たな波形を生む現象のことを指す。電子や原子などの量子は、粒子と波の性質を併せ持つため、タイミングに応じてこの干渉を起こす。光では干渉縞、音波ではうなりなどの形で現れる。
- (4) **フォノン**：結晶を構成する原子やイオンは、安定を保った位置で小さな振動（格子振動）を行っている。この格子振動は音波と同じ性質を持っており、その「波」としての動きを量子力学の視点から「粒子」としてとらえたものをフォノンという。音響量子、音子などとも呼ばれる。縦波光学フォノンは光によって生成されたフォノンで、振動の振幅方向が進行方向と同じ縦波のものを指す。

- (5) **偏光**：光は電磁波の一種として波の性質を持っており、太陽光などの自然光の波は上下、左右の振動が混ざって多方向に揺れている。人工的な操作により、一方向のみに偏って揺れる光のことを偏光という。
- (6) **位相**：振動や波動など、時間とともに周期的に変化する運動の過程において、全過程のどの位置にあるかを示す量。

【論文情報】

掲載誌：*Physical Review B*

論文タイトル：Ultrafast quantum path interferometry to determine the electronic decoherence time of the electron-phonon coupled system in n-type gallium arsenide

著者：高木一旗、萱沼洋輔、中村一隆

DOI：10.1103/PhysRevB.107.184305

【問い合わせ先】

東京工業大学 科学技術創成研究院 フロンティア材料研究所 准教授

中村一隆

Email: nakamura.k.ai@m.titech.ac.jp

TEL: 045-924-5387

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661